

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-267926

(43)Date of publication of application : 18.09.2002

(51)Int.Cl. G02B 13/00
G02B 13/04
G02B 13/18
G06F 17/50

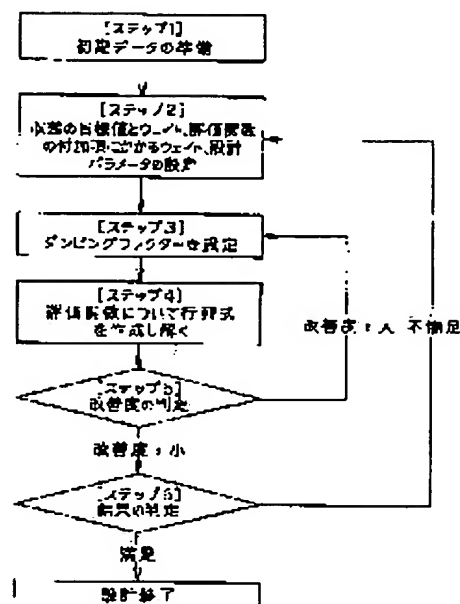
(21)Application number : 2001-064836 (71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD
(22)Date of filing : 08.03.2001 (72)Inventor : HAYAKAWA KAZUHITO

(54) DESIGNING METHOD OF OPTICAL SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a designing method of optical system for efficiently performing the design of an optical system, which is suitably executed with a computer and where the performance change of the optical system caused by a manufacture error is restrained in addition to optical design for aberration.

SOLUTION: In this designing method of optical system, the values of a plurality of component elements are changed so that the optical system expressed by the plurality of component elements may have desired characteristic, and an evaluation function for evaluating that the value of each component element approaches to the optimum value of the component element as the entire optical system is made to approach to the desired value, whereby the optimum value of the component element is obtained. The method has a means for calculating the eccentric aberration coefficient of an optical group consisting of at least one surface of the optical action surfaces of the optical system and the evaluation function including at least one item of the evaluation function consisting of at least one eccentric aberration coefficient.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-267926
(P2002-267926A)

(43) 公開日 平成14年9月18日 (2002.9.18)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 2 B 13/00		G 0 2 B 13/00	2 H 0 8 7
		13/04	D 5 B 0 4 6
		13/18	
G 0 6 F 17/50	6 8 0	G 0 6 F 17/50	6 8 0 A

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2001-64836(P2001-64836)

(22) 出願日 平成13年3月8日 (2001.3.8)

(71) 出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社
東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

(72) 発明者 早川 和仁

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号 オリ
ンパス光学工業株式会社内

(74) 代理人 100097777

弁理士 荻澤 弘 (外7名)

Fターム(参考) 2H087 LA03 PA04 PA18 PB05 QA02

QA03 QA07 QA17 QA19 QA21

QA26 QA34 QA41 QA46 RA05

RA12 RA42

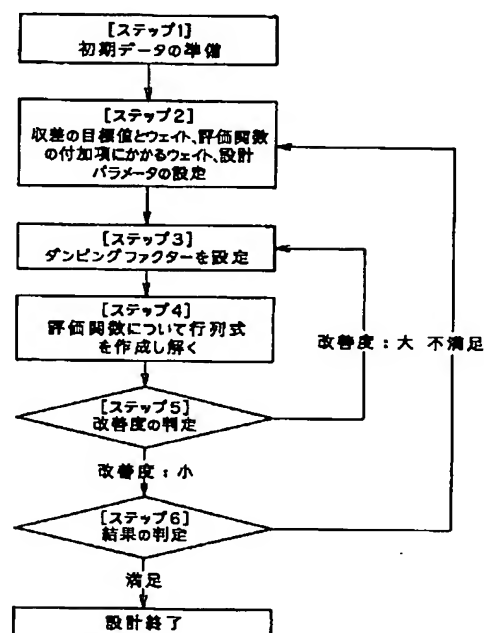
5B046 AA09 BA02

(54) 【発明の名称】 光学系の設計手法

(57) 【要約】

【課題】 コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法。

【解決手段】 複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、その複数の構成要素の値を変更し、各構成要素の値が光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む評価関数とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、
前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、
前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計手法。

【請求項2】 前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることを特徴とする請求項1記載の光学系の設計手法。

【請求項3】 複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことを特徴とする請求項2記載の光学系の設計手法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学系の設計手法に関し、特に、コンピュータ等の計算処理装置での実行に適した光学系の設計手法、及び、光学系の設計プログラムを記録した記録媒体、及び、本光学系の設計手法乃至光学系の設計プログラムを用いて設計した光学系及び光学装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光学系の設計手法では、最急降下法、共役勾配法、最小二乗法等が利用されている。何れの方法も、最適化手法と呼ばれるもので、複数の変数を有する評価関数が用いられる。これらの最適化手法を光学系の設計に用いた場合、評価関数の変数に相当するのが評価項目（例えば、収差係数）である。この評価項目は、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率等といった光学系の構成要素の値に基づいて算出される。よって、構成要素の値を変化させると評価項目の値が変化し、評価項目の値が変化すると評価関数の値が変化する。そこで、構成要素の値を様々に変化させ、評価関数の最適値（例えば、最小値や極小値）を求める処理を行う。このようにして評価関数の最適値が得られると、そのときにおける各構成要素の値の組み合わせが最適な光学系を表すことになる。この結果、理想状態に近い光学系の構成要素の値が得られる。なお、評価関数の最適値を求める際には、同時に評価項目も所望の目標値へと近づけることを行う。このように、光学系の設計は、評価関数が最適値となり、かつ、評価項目が目標値の範囲内に到達するような、光学系の構成要素の値の組み合わせを求めるものである。

【0003】上述のように、光学系の設計に際しては、

基本的な変数として、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率を用いるのが一般的である。また、評価関数は、光線収差や光学系の仕様で決まる制限条件等を評価項目として用いるのが一般的である。

【0004】しかしながら、従来の光学系の設計では、理想的な状態で光学系を設計しているため、光学系の製造誤差の影響を無視した設計となる傾向がある。そのため、製造誤差による光学系の性能の変化を考慮に入れた、最適な光学系の構成要素の値の組み合わせ（設計値）を得ることが困難であった。

【0005】従来の技術においては、設計者の経験や知識といったノウハウ等に基づいて、製造誤差による光学系の性能の変化が少なくなるように、コンピュータで得た設計値から設計者自身の手作業によって設計値に若干の修正を加えたり、光学系の変数の一部を固定値とし、変数の数に制限をかける等をして、最適な光学系の設計値を得るといった作業を行う必要があった。

【0006】このため、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、従来の光学系の設計では人手と時間が必要で、効率的な光学系の設計が行えなかった。また、製造誤差による性能の変化を小さく抑え、かつ、設計性能が所望の値となる最適な光学系の設計値を得るのが難しい。

【0007】近年、上記の問題点を鑑み、特開平11-30746号公報、特開平11-223764号公報、特開平11-223769号公報、特許第3006611号公報等で新たな設計法が提案されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】特開平11-30746号で開示されている方法においては、注目している光学群以外の偏心収差係数の絶対値が急激に悪化して、結果的に製造誤差の影響を受ける設計値が得られてしまう。これを回避するため、その都度注目する光学群の偏心収差係数を増やしていくことは、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0009】特開平11-223764号、特開平11-223769号で開示されている方法においては、球面収差係数とコマ収差係数のみに注目しているため、光学系の偏心による非点収差や像面の傾きによる性能変化の顕著な光学系においては、製造誤差の影響を受け難い設計解が得られなくなり、問題がある。

【0010】特許第3006611号で開示されている方法においては、複数の光学部材で構成される光学系に対して、全ての製造誤差を考慮した設計状態を実現すること、全ての状態での評価関数を定義することが必要であったり、評価関数が複雑となるために評価関数の計算量が莫大となってしまう、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0011】本発明は従来技術の上記問題に鑑みてなす

れたものであり、その目的は、コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする手法である。

【0013】この場合、前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることが望ましい。

【0014】また、複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことが望ましい。

【0015】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心コマ収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0016】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心非点収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0017】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心ペッツバル収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0018】本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計プログラムにおいて、前記評価関数は少なく

(収差) = (偏心のない状態での収差) + (偏心により発生する収差)

(1)

で定義される。式(1)から明らかなように、光学系の一部が偏心することによって生ずる収差(偏心収差)によって、光学系の性能は変化してしまう。現実の光学系では、偏心はレンズの製造、あるいは、レンズの組み立て時の製造誤差(組み立て誤差)として現れる。このように、偏心(製造誤差)は、理想的な光学系の性能を得ることを困難ならしめる要因の1つとなっている。

【0024】光学作用面や光学群が偏心することによって、光学系の結像性能に変化が発生するが、この変化を代弁する指標の1つに、偏心収差係数がある。偏心収差係数には、偏心コマ収差、偏心非点収差、偏心ペッツバル収差(偏心による像面の傾きの収差)、偏心デステーション(偏心歪曲収差)、偏心による像のずれがある。これら偏心収差係数は、近軸光線の追跡結果と3次の収差係数により記述される。

【0025】なお、偏心収差並びに偏心収差係数の導出方法は、松居吉哉著「偏心の存在する光学系の3次の収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、1990年)に、3次の収差係数の導出については、松居吉哉著「収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、

とも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計プログラムを含むものである。

【0019】また、上記の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体を含むものである。

【0020】さらに、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学系を含むものである。

【0021】また、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学装置を含むものである。

【0022】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。まず、本発明で用いる偏心収差係数について説明する。

【0023】光学系を構成する光学作用面、又は、少なくとも1面の光学作用面よりなる光学群の光軸が、光学系の基準軸に対して一致していない状態を偏心状態という。この中、図2に示すように、上記光軸が基準軸に対して平行にずれた状態を平行偏心、図3に示すように、上記光軸が基準軸に対して傾きを持って交わるような状態を傾き偏心とする。光学系に前述のような平行偏心乃至傾き偏心が発生した状態の光学系の収差は、

1989年)に詳述されているため、割愛し、偏心収差係数と偏心収差の定義のみを記述する。

【0026】まず、偏心収差係数を導出に必要な光学系の第i面における近軸光線の諸量と3次の収差係数を、

【0027】

【数1】

h_i : 軸上マージナル光線の光線の高さ

α_i : 軸上マージナル光線の物体空間における換算傾角

α'_i : 軸上マージナル光線の像空間における換算傾角

h_i : 近軸主光線の光線の高さ

α_i : 近軸主光線の物体空間における換算傾角

α'_i : 近軸主光線の像空間における換算傾角

I_i : 球面収差係数

II_i : コマ収差係数

III_i : 非点収差係数

P_i : ベッツパール収差係数

V_i : ディストーション (歪曲収差係数)

$$\Delta Y_\delta = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ (\Delta\delta)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\delta_1)_i - (V\delta_2)_i \} \right. \\ \left. + 2rh \{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \quad (2)$$

$$\Delta Z_\delta = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\delta_1)_i + 2rh \{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \quad (3)$$

で定義される。ただし、 h 、 r 、 ϕ_r 、 ϕ_ω は、図 1 より、

【0031】

【数3】

$$\tan \omega \cos \phi_\omega \equiv \frac{Y}{g} \quad \tan \omega \sin \phi_\omega \equiv \frac{Z}{g} \\ r \cos \phi_r \equiv \left(\frac{\hat{g}}{g} \right) Y^* \quad r \sin \phi_r \equiv \left(\frac{\hat{g}}{g} \right) Z^*$$

$$h \equiv N \tan \omega$$

$$(II\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) - (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n I_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n I_\nu) \quad (4)$$

と、平行偏心非点収差係数 $(III\delta)_i$ は、

【数5】

【0034】

$$(III\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n III_\nu) - (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) \quad (5)$$

と、平行偏心ベッツパール収差係数 $(P\delta)_i$ は、

【数6】

【0035】

と定義する。ここで、近軸光線の諸量とは、光学系の面に入射する光線の入射光線高と入射角である。

【0028】前述のように、偏心状態には平行偏心と傾き偏心の2種類の状態があるが、先に平行偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論じ、次に傾き偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論ずる。

【0029】光学系が n 面の光学作用面により構成されている光学系において、図 2 のように、 j 面から k 面で構成される第 i 群が光学系の基準軸に対して、 δ_i だけ平行偏心した場合を考える。この場合、光学系の平行偏心による光線の横収差 ΔY_δ 、 ΔZ_δ を幕で展開すると、

【0030】

【数2】

で定義される。 N は光学系の物体側の屈折率、 ω は物点と物体側主点 H とを結ぶ直線が光軸となす角、 ϕ_ω はそのアジマス、また、 r は物体側主平面上に換算した入射瞳半径で、 ϕ_r がそのアジマスである。

【0032】また、平行偏心コマ収差係数 $(II\delta)_i$

i は、

【0033】

【数4】

と、平行偏心デイスティンクション収差係数 ($V\delta_1$, $V\delta_2$) は、
 $(P\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n P_\nu)$ (6) 【0036】
 【数7】

$$V\delta_1 = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) \quad (7)$$

$$V\delta_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu \quad (8)$$

と、平行偏心による像のずれ ($(\delta)_1$) は、
 【0037】

$$(\Delta\delta)_i = -2(\alpha'_k - \alpha_j) \quad (9)$$

と定義できる。

【0038】 平行偏心と同様に、光学系が n 面の光学作用面により構成されている光学系において、図3のように、 j 面から k 面で構成される第 i 群が光学系の基準軸に対して、 ϵ_1 だけ傾き偏心した場合を考える。この場

合の、光学系の傾き偏心による光線の横収差 ΔY_ϵ 、 ΔZ_ϵ を算で展開すると、
 【0039】
 【数9】

$$\begin{aligned} \Delta Y_\epsilon = & -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \left\{ (\Delta\epsilon)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\epsilon_1)_i - (V\epsilon_2)_i \} \right. \\ & + 2rh \{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \\ & \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_\epsilon = & -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\epsilon_1)_i + 2rh \{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ & \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

で定義される。このとき、傾き偏心コマ収差係数 ($II\epsilon$)₁ は、
 【0040】
 【数10】

$$(II\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n I_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n I_\mu) \quad (12)$$

と、傾き偏心非点収差係数 ($III\epsilon$)₁ は、
 【0041】

$$(III\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n III_\mu e - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n III_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) \quad (13)$$

と、傾き偏心ペッツバル収差係数 ($P\epsilon$)₁ は、
 【0042】

$$(P\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n P_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n P_\mu) + (\frac{\alpha'_k}{N'_k} - \frac{\alpha_j}{N_j}) \quad (14)$$

と、傾き偏心デイスティンクション収差係数 ($V\epsilon_1$, $V\epsilon_2$) は、
 【0043】
 【数13】

$$V_{c1} = (\alpha'_k q'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j q_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\nu=j}^n III_\nu) + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j} \right) \quad (15)$$

$$V_{c2} = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j} \right) \quad (16)$$

と、傾き偏心による像のずれ $((\epsilon)_1)$ は、
【0044】

と定義できる。ただし、 $P_j = \frac{(\Delta p)_j}{q_j} = \frac{2(\alpha'_k q'_k - \alpha_j q_j)}{q_j}$
 k は、図3に示すように、それぞれ、
 p_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の入射端面までの距離
 p'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の射出端面までの距離
 q_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の物体面までの距離
 q'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の像面まで

の距離で定義される量である。

【0045】次に、従来の評価関数 F_0 を用いた光学系の設計手法について、例として、最小二乗法の一つである減衰最小二乗法(DLS法)を用いた場合で説明する。ここで、従来の評価関数 F_0 は、光学系に偏心が生じていないことを前提としている。

【0046】DLS法での評価関数 F は、

【0047】

【数15】

$$F_0 = \sum_{a=1}^m f_a^2 + \sum_{b=1}^n D(x_b - x_{0b})^2 \quad (18)$$

で定義される。DLS法の場合、評価関数 F_0 の値がの極小値となったときに、各収差が良好に補正され、かつ、全体としても収差のバランスが取れた光学系となる。この評価関数 F_0 の極小値を求めるためには、

【0048】

【数16】

$$\frac{\partial F_0}{\partial x_b} = 0 \quad (19)$$

を満足する x_b の組を求めればよい。ここで、 f_a は光学系の収差に関し、 w_a を第 a 番目の収差のウェイト、 R_a を a 番目の収差の値、 T_a を第 a 番目の収差の目標値としたとき、

$$f_a = w_a (R_a - T_a)^2$$

で定義される。ただし、各収差値 R_a は設計パラメータ x_1, x_2, \dots, x_n の関数である。また、設計パラメータ x_b は曲率半径や面間隔、屈折率等の光学系の構成要素の値、 x_{0b} は設計開始時点における設計パラメータ、 D はダンピングファクターをそれぞれ表している。ダンピングファクター D は、設計パラメータが設計開始時点での値(初期値)から離れることを適度に防ぐ働きをする。また、 m は評価を行う収差の数、 n は設計

に用いるパラメータの数をそれぞれ表している。

【0049】上記のような評価関数 F_0 において、初期値近傍では各収差値が設計パラメータの線形関数として近似できる。このため、式(19)は x_b に対して線形な連立方程式となるので、最小二乗法により解くことが可能であり、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に計算することができる。

【0050】DLS法以外の手法においても、各手法に則した評価関数が定義されている。また、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に評価関数の所望の値を求めることができる。よって、これらの手法とコンピュータを組み合わせれば、最適な光学系の設計値を高速かつ容易に得ることができる。

【0051】評価関数の所望の値は、上記DLS法に示した極小値とする場合以外に、極大値とする場合等、設計手法により様々である。

【0052】さて、本発明の実施形態にかかる光学系の設計手法について説明する。本発明の実施形態である評価関数 F は、

【0053】

【数17】

$$F = F_0 + F_{dec} \quad (20)$$

で定義される。ただし、 F_0 は、従来の設計手法における評価関数を表す。また、 F_{dec} は、 $(II\delta)_1$ 、 $(I II\delta)_1$ 、 $(P\delta)_1$ 、 $(II\epsilon)_1$ 、 $(III\epsilon)_1$ 、 $(P\epsilon)_1$ の中、少なくとも1つの偏心収差係数により定義される評価関数の項である。このような評価関数を用いることで、従来の評価関数 F_0 では考慮しなかった

偏心による光学性能の変化成分を、光学系の設計に加味することができる。よって、光学群の偏心により発生する光学系の性能劣化が抑制され、かつ、偏心のない状態での光線収差が小さい、最適な光学系の設計値を求めることが可能となる。

【0054】さらに好ましくは、 F_{dec} は、各光学群で

生ずる偏心収差係数の絶対値の冪乗和の項からなるとよい。このような評価関数を用いることで、偏心収差係数の絶対値が大きい光学群があったとしても、その偏心収差係数の絶対値を小さくすることができる。しかも、同時に、他の光学群の偏心収差係数の絶対値が大きくなることを抑制することができる。この結果、評価関数の最適値をより速く求めることができる。よって、本発明の設計手法では、従来の設計手法よりも効率的な設計がで

$$F_{dec} = \omega_{lls} f \left(\sum_{i=1}^n |(\Pi\delta)_i|^{kn_i} \right) \quad (21)$$

このような評価関数を用いることで、平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きい光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値を小さくすると同時に、他の光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きくなり難くすることができ、従来の設計手法よりも効率的な設計ができる。

【0057】上記では、平行偏心コマ収差係数の場合について述べているが、平行偏心コマ収差係数を平行偏心非点収差係数、平行偏心ベッツパール収差係数、傾き偏心コマ収差係数、傾き偏心非点収差係数、傾き偏心ベッツパール収差係数と変更しても、同様の効果が得られることは言うまでもない。

【0058】また、評価関数の項（変数）を1つの偏心収差係数の絶対値の冪乗の和ではなく、複数の偏心収差係数の和の絶対値の冪乗や、絶対値の和の冪乗とすることもできる。この場合、前述と同様な効果が得られることは言うまでもなく、さらに、光学群内でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0059】また、上述の複数の偏心収差係数について冪乗したものについて和をとり、それを評価関数の評価項目とすることもできる。このようにすれば、光学系全体でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0060】また、任意の実数kは、 $1 \leq k \leq 4$ なる条件を満たすことがよい。上記条件を外れると、収差値の最適化と製造誤差による光学系の性能変化の抑制を両立させることが難しくなってしまう、問題となってしまう。

【0061】さらに好ましくは、 $k=2$ とすることで、本発明における光学系の設計手法を最も有効に働かせることができ、さらに、コンピュータの計算を高速にできるので、最も望ましい。

【0062】図4は、本実施形態にかかる光学系の設計手法の手順を示すフローチャートである。ステップ1で、光学系の初期データを用意する。ステップ2で、諸収差の目標値とウェイトといった従来の評価関数にかかる諸パラメータ、及び、本設計手法で導入した評価関数にかかる諸パラメータを設定する。ステップ3で、ダンピングファクターを設定する。ここで、通常はダンピン

きる。

【0055】例えば、n個の光学群よりなる光学系において、平行偏心コマ収差係数に着目する場合、 F_{dec} は、式(21)のように定義することが好ましい。ただし、 ω は設計者自身の定めるウェイト、kは任意の実数である。

【0056】

【数18】

グファクターのデフォルト値が設定される。以上のステップで、評価関数を決定する。次に、ステップ4において、評価関数についての行列式、すなわち、連立方程式を作成し、解を得る。続くステップ5で、評価関数の値を評価し、評価関数の値が所望の値に到達したと判定した場合、続くステップ6へと進み、到達し得ない場合、ステップ3へと戻る。ステップ6において、得られた設計値が設計目標を満足するならば、設計を終了し、不満足ならば、ステップ2に戻り、設計条件を変更して設計を続行する。上述したフローにおいて、ステップ3からステップ5までがコンピュータのプログラムに適している。

【0063】以下に、本発明の実施形態を用いて設計した光学系の実施例を示す。

【0064】実施例1は、デジタルカメラの光学系に、本発明の平行偏心コマ収差係数を用いた光学系の設計手法を適用した場合について示す。図5に示すような光路図を持ち、以下の表1に示すような設計開始時のレンズデータを持つ光学系の結像性能を表すMTFは、図6の通りである。ただし、図5において数字1～12は面番号を示し、符号A～Eはレンズエレメント番号を示す。なお、光学系の仕様は、焦点距離=3.9mm、Fナンバー=2.8、理想像高=2.4mmであり、像評価に用いるMTFは、空間周波数50本/mmでの評価とする。図6(a)は軸上でのMTF、図6(b)は像高の0.7でのMTFであり、横軸はデフォーカスであり、実線はサジタル方向の値、破線はメリジオナル方向の値である。

【0065】この光学系のレンズエレメントを光学群の単位とし、各エレメントが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、軸上光束の結像性能の変化を表したものが表2である。ただし、R(%)はサジタル方向のMTFの変化値、T(%)はメリジオナル方向の変化値である。この表の値が小さい程、光学群が偏心しても性能への影響が小さいことに対応している。

【0066】このような光学系に対して、DLS法を基に評価関数を式(22)と定義した本発明の設計方法を適用した結果、図7に示すような光路図を持ち、以下の表3に示すような設計終了時のレンズデータを持つよう

な光学系が得られる。
【0067】

【数19】

$$F = F_0 + w_{\text{us}} \sum_{i=1}^k |(\Pi\delta)_i|^2 \quad (22)$$

このときの結像性能を表す図6と同様のMTFは図8の通りであり、設計開始時点での結像性能と略同等である。この光学系の各レンズが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、結像性能が表4のような変化となる。このことから、設計開始時点と略同等の性能を達成し、かつ、各レンズの平行偏心による性能の変化が発生し難い光学系の設計値を得ることができる。また、平行偏心コマ収差係数の絶対値の二乗和は、表5のように小さくなっている。

ータを示す。ただし、光学系データの非球面は、コーニック係数：K、曲率：c（ $c = 1/\text{曲率半径}$ ）、4次の非球面係数 AC_4 、・・・を用いて、以下の式で定義される。

$$\text{【0069】 } Z = c r^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + K) c^2 r^2}] + AC_4 r^4 \dots$$

ここで、Zは光軸に沿った座標軸、rはZ軸からの半径である。

【0070】

【0068】以下に、設計開始時点と設計後の光学系デ

表1

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッベ数
物体面	∞	∞		
1	8.9512	0.8000	1.48749	70.23
2	2.2965	3.9071		
3	224.8333	1.8986	1.83400	37.16
4	-4.8216	0.8000		
絞り面	∞	2.8850		
6	-3.1214	0.8000	1.84666	23.78
7	4.5368	4.0000	1.78590	44.20
8	-4.9428	0.1937		
9	7.7737（非球面）	3.3651	1.56384	60.67
10	-11.3280	1.9084		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.1013		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC_4		
9	0.0	-8.8037×10^{-4}		

【0071】

表2

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
$\Delta MTF \quad R \quad (\%)$	-10.6	-19.6	-1.2	-0.2	0.0
$\Delta MTF \quad T \quad (\%)$	-26.9	-46.2	-12.4	-1.1	0.0

【0072】

表3

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッベ数
物体面	∞	∞		
1	-1447.5433	0.8000	1.48749	70.23
2	3.1192	3.7577		
3	18.5526	1.8222	1.83400	37.16
4	-6.7327	0.8000		

絞り面	∞	2.8871		
6	-3.6762	0.8000	1.84666	23.78
7	5.4479	4.0000	1.77250	49.60
8	-5.2921	0.1934		
9	8.1262 (非球面)	3.1860	1.56384	60.67
10	-10.4919	2.1689		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.2598		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC ₄		
9	0.0	-9.7855 $\times 10^{-4}$		

【0073】

表4

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
ΔMTF R (%)	-3.6	-5.5	-0.6	-0.4	0.0
ΔMTF T (%)	-9.9	-23.3	-12.2	-1.2	0.0

【0074】

表5

設計開始時	設計後
0.0516	0.0170

【0075】以上、本発明の光学系の設計手法をその原理と実施例に基づいて説明してきたが、本発明はこれら実施例等に限定されず種々の変形が可能である。

【0076】以上の本発明の光学系の設計手法は、例えば次のように構成することができる。

【0077】〔1〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計手法。

【0078】〔2〕前記光学系の近軸光線を計算する手段と、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の収差係数を計算する手段と、前記収差係数と前記近軸光線とからなる偏心収差係数を計算する手段とを有することを特徴とする上記1記載の光学系の設計手法。

【0079】〔3〕 n 個の光学群よりなる前記光学系において、偏心収差係数の冪乗和を計算する手段と、少

なくとも1つの偏心収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記2記載の光学系の設計手法。

【0080】〔4〕偏心コマ収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3記載の光学系の設計手法。

【0081】〔5〕偏心非点収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0082】〔6〕偏心ベッツパール収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0083】〔7〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計プログラムにおいて、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計プログラム。

【0084】〔8〕 上記7記載の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体。

【0085】〔9〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学系。

【0086】〔10〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学装置。

【発明の効果】以上の説明から明らかなように、本発明の光学系の設計手法によると、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うことができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】光学系を模式的に示す光軸を含む断面図である。

【図2】光学系の平行偏心を説明するための図である。

【図3】光学系の傾き偏心を説明するための図である。

【図4】本発明の1実施形態にかかる光学系の設計手法の手順を示すフローチャートである。

【図5】本発明の1実施例の設計開始時のレンズ系の光路図である。

【図6】図5のレンズ系のMTFを示す図である。

【図7】本発明の1実施例の設計終了時のレンズ系の光路図である。

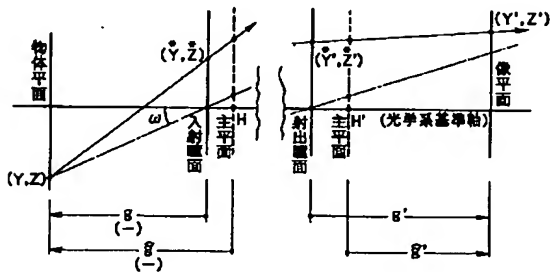
【図8】図7のレンズ系のMTFを示す図である。

【符号の説明】

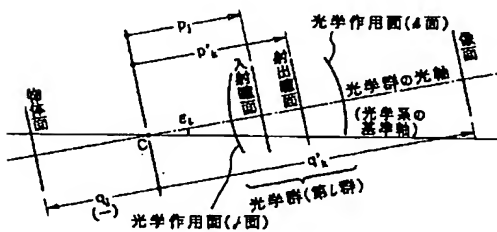
1～12…第1面～第11面

A～E…レンズエレメント

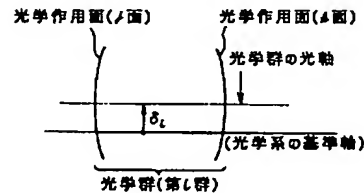
【図1】



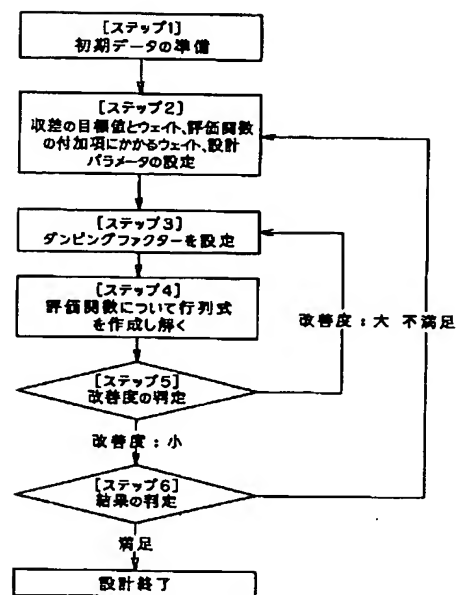
【図3】



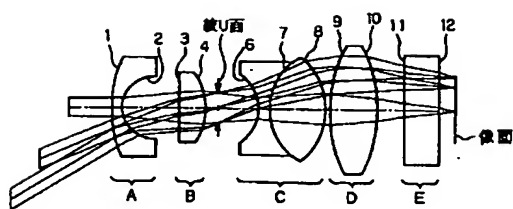
【図2】



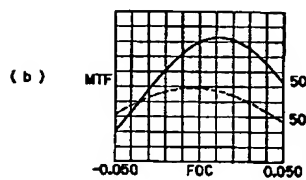
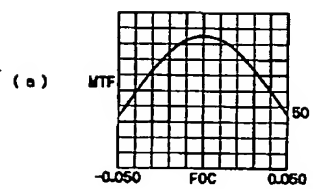
【図4】



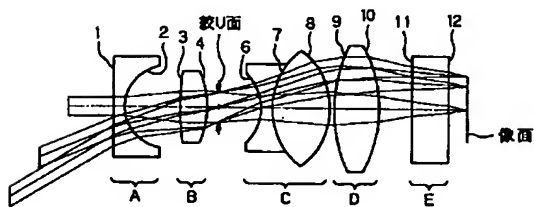
【図 5】



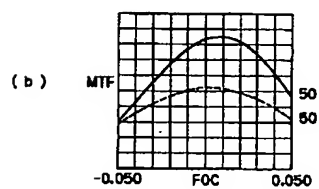
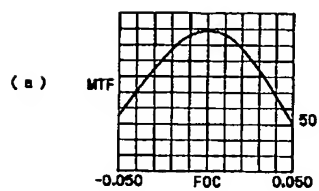
【図 6】



【図 7】



【図 8】



PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-267926

(43)Date of publication of application : 18.09.2002

(51)Int.Cl. G02B 13/00
G02B 13/04
G02B 13/18
G06F 17/50

(21)Application number : 2001-064836

(71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 08.03.2001

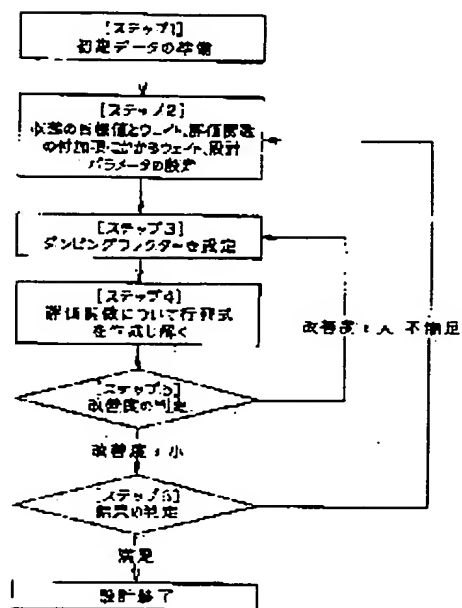
(72)Inventor : HAYAKAWA KAZUHIITO

(54) DESIGNING METHOD OF OPTICAL SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a designing method of optical system for efficiently performing the design of an optical system, which is suitably executed with a computer and where the performance change of the optical system caused by a manufacture error is restrained in addition to optical design for aberration.

SOLUTION: In this designing method of optical system, the values of a plurality of component elements are changed so that the optical system expressed by the plurality of component elements may have desired characteristic, and an evaluation function for evaluating that the value of each component element approaches to the optimum value of the component element as the entire optical system is made to approach to the desired value, whereby the optimum value of the component element is obtained. The method has a means for calculating the eccentric aberration coefficient of an optical group consisting of at least one surface of the optical action surfaces of the optical system and the evaluation function including at least one item of the evaluation function consisting of at least one eccentric aberration coefficient.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

* NOTICES *

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] It is the design technique of the optical system which said performance index has at least one evaluation criteria as a variable in the design technique of optical system of designing using a performance index, and is characterized by said evaluation criteria containing the eccentric aberration coefficient of the 1st [at least] page of the optical operating surface of said optical system.

[Claim 2] The design technique of the optical system according to claim 1 characterized by having the process which calculates the amount of many of a paraxial ray after the optical axis of all the optical operating surfaces of said optical system and the reference axis of said optical system have been in agreement, and the process which calculates the aberration coefficient of the 1st [at least] page of the optical operating surface of said optical system in this condition, and having the process which calculates said eccentric aberration coefficient from said aberration coefficient and said amount of paraxials.

[Claim 3] It is the design technique of the optical system according to claim 2 which is equipped with the process which calculates the power sum of an eccentric aberration coefficient from two or more optical operating surfaces, and is characterized by said evaluation criteria containing the power sum of said eccentric aberration coefficient.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and NCIP I are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] Especially this invention relates to the optical system and optical equipment which were designed using the record medium which recorded the design technique of optical system of having been suitable for activation with computation equipments, such as a computer, and the design program of optical system and the design technique of this optical system thru/or the design program of optical system about the design technique of optical system.

[0002]

[Description of the Prior Art] By the design technique of optical system, the steepest descent method, a conjugate gradient method, the least square method, etc. are used. Any approach is called an optimization technique and the performance index which has two or more variables is used. When these optimization techniques are used for the design of optical system, evaluation criteria (for example, aberration coefficient) are equivalent to the variable of a performance index. These evaluation criteria are computed based on the value of the component of optical system, such as radius of curvature of an optical operating surface, a spacing, and a refractive index. Therefore, if the value of evaluation criteria will change if the value of a component is changed, and the value of evaluation criteria changes, the value of a performance index will change. Then, the value of a component is changed variously and processing which calculates the optimum value (for example, the minimum value and the minimal value) of a performance index is performed. Thus, when the optimum value of a performance index is acquired, optical system with the optimal combination of the value of each component at that time will be expressed. Consequently, the value of the component of the optical system near an ideal condition is acquired. In addition, in case the optimum value of a performance index is calculated, it performs also bringing evaluation criteria close to desired value to coincidence. Thus, the design of optical system searches for the combination of the value of a component of optical system with which a performance index serves as an optimum value, and evaluation criteria reach within the limits of desired value.

[0003] As mentioned above, it is common to use the radius of curvature of an optical operating surface, a spacing, and a refractive index as a fundamental variable on the occasion of the design of optical system. Moreover, as for a performance index, it is common to use the restriction decided by the specification of beam-of-light aberration or optical system as evaluation criteria.

[0004] However, in the design of the conventional optical system, since optical system is designed in the ideal condition, there is an inclination used as the design which disregarded the effect of the manufacture error of optical system. Therefore, it was difficult to acquire the combination (design value) of the value of the component of the optimal optical system which took change of the engine performance of the optical system by the manufacture error into consideration.

[0005] In a Prior art, based on experience of a designer, the know-how of knowledge, etc., so that change of the engine performance of the optical system by the manufacture error may decrease. Some correction needed to be added to the design value by a designer's own handicraft from the design value acquired by computer, or a part of variable of optical system needed to be made into the fixed value, it needed to carry out applying a limit to the number of variables etc., and the activity of acquiring the design value of the optimal optical system needed to be done.

[0006] For this reason, in spite of improvement in the calculation speed of a computer, by the design of the conventional optical system, a help and time amount were required and efficient optical system was not able to be designed. Moreover, it is difficult to acquire the design value of the optimal optical system from which change of the engine performance by the manufacture error is small suppressed, and the design engine performance serves as a desired value.

[0007] In recent years, in view of the above-mentioned trouble, a new design method is proposed in JP,11-30746,A, JP,11-223764,A, JP,11-223769,A, the patent No. 3006611 official report, etc.

[0008]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] In the approach currently indicated by JP,11-30746,A, the absolute value of eccentric aberration coefficients other than the optical group currently observed will get worse rapidly, and the design value influenced of a manufacture error as a result will be acquired. A help and time amount are needed as a result, and increasing the eccentric aberration coefficient of the optical group observed each time, in order to avoid this has a problem in the viewpoint of an efficient design.

[0009] In the approach currently indicated by JP,11-223764,A and JP,11-223769,A, since only the spherical-aberration multiplier and the comatic-aberration multiplier are observed, in the remarkable optical system of the engine-performance change by the inclination of the astigmatism by the eccentricity of optical system, or the image surface, the design solution which cannot be easily influenced of a manufacture error is no longer acquired, and there is a problem.

[0010] In the approach currently indicated by patent No. 3006611 The design condition in consideration of all the manufacture errors is realized to the optical system which consists of two or more optical members. Since it is required to define the performance index in all conditions or a performance index becomes complicated, the computational complexity of a performance index becomes immense, in spite of improvement in the calculation speed of a computer, a help and time amount are needed as a result, and there is a problem in the viewpoint of an efficient design.

[0011] It is this invention's being made in view of the above-mentioned problem of the conventional technique, and the purpose's being suitable for performing by computer, and offering the design technique of the optical system for designing efficiently optical system which controlled engine-performance change of the optical system by the manufacture error in addition to optical designs, such as many aberration.

[0012]

[Means for Solving the Problem] In the design technique of optical system in which this invention which attains the above-mentioned purpose designs using a performance index, said performance index has at least one evaluation criteria as a variable, and said evaluation criteria are technique characterized by including the eccentric aberration coefficient of the 1st [at least] page of the optical operating surface of said optical system.

[0013] In this case, it is desirable to have the process which calculates the amount of many of a paraxial ray after the optical axis of all the optical operating surfaces of said optical system and the reference axis of said optical system have been in agreement, and the process which calculates the aberration coefficient of the 1st [at least] page of the optical operating surface of said optical system in this condition, and to have the process which calculates said eccentric aberration coefficient from said aberration coefficient and said amount of paraxials.

[0014] Moreover, it has the process which calculates the power sum of an eccentric aberration coefficient from two or more optical operating surfaces, and, as for said evaluation criteria, it is desirable to include the power sum of said eccentric aberration coefficient.

[0015] Moreover, the power sum of said eccentric aberration coefficient may be made into the power sum of an eccentric comatic-aberration multiplier.

[0016] Moreover, the power sum of said eccentric aberration coefficient may be made into the power sum of an eccentric astigmatism multiplier.

[0017] Moreover, the power sum of said eccentric aberration coefficient may be made into the power sum of an eccentric PETTSU bar aberration coefficient.

[0018] In the design program of the optical system to which this invention designs using a performance index, said performance index has at least one evaluation criteria as a variable, and said evaluation criteria include the design program of the optical system characterized by including the eccentric aberration coefficient of the 1st [at least] page of the optical operating surface of said optical system.

[0019] Moreover, the record medium of the design program of the optical system characterized by recording the design program of the above-mentioned optical system is included.

[0020] Furthermore, this invention includes a design of the optical system characterized by being manufactured using the design technique of which the above-mentioned optical system, or the design program of the above-mentioned optical system.

[0021] Moreover, this invention contains a design of the optical equipment characterized by being manufactured using the design technique of which the above-mentioned optical system, or the design program of the above-mentioned optical system.

[0022]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, the gestalt of operation of this invention is explained. First, the eccentric aberration coefficient used by this invention is explained.

[0023] The condition that the optical axis of an optical group which consists of an optical operating surface which constitutes optical system, or a page [1st / at least] optical operating surface is not in agreement to the reference axis of optical system is called eccentric condition. As shown in drawing 2 in this, it inclines and let the condition that the above-mentioned optical axis crosses the condition that the above-mentioned optical axis shifted in parallel to the reference axis, with an inclination to a reference axis as shown in parallel eccentricity and drawing 3 be eccentricity. Aberration of the optical system in the condition that the above parallel eccentricity thru/or inclination eccentricity occurred in optical system (aberration) = (aberration in condition that there is no eccentricity) + (aberration generated with eccentricity)

(1)

It comes out and defines. The engine performance of optical system will change with the aberration (eccentric aberration) produced when a part of optical system carries out eccentricity so that clearly from a formula (1). In actual optical system, eccentricity appears as a manufacture error at the time of manufacture of a lens, or the assembly of a lens (assembly error). Thus, eccentricity (manufacture error) is one of the factors which closes obtaining the engine performance of ideal optical system if .

[0024] Although change occurs for the image formation engine performance of optical system when an optical operating surface and an optical group carry out eccentricity, an eccentric aberration coefficient is in one of the indexes which pays this change by proxy. There is a gap of the image by eccentric comatic aberration, eccentric astigmatism, eccentric PETTSU bar aberration (aberration of the inclination of the image surface by eccentricity), eccentric distortion (eccentric distortion aberration), and eccentricity in an eccentric aberration coefficient. These eccentricity aberration coefficient is described by the trace result of a paraxial ray, and the 3rd aberration coefficient.

[0025] In addition, about derivation of the 3rd aberration coefficient, since the derivation approach of an eccentric aberration coefficient is explained by the eccentric aberration list in full detail in Yoshiya Matsui work "an aberration theory" (Japan Optoelectro Mechanics Association, 1989), it is omitted in Yoshiya Matsui work "the 3rd aberration theory of the optical system in which eccentricity exists" (Japan Optoelectro Mechanics Association, 1990), and describes only the definition of an eccentric aberration coefficient and eccentric aberration in it at it.

[0026] First, it is the amount of many of a paraxial ray and the 3rd aberration coefficient [0027] [in / for an eccentric aberration coefficient / the i-th page of optical system required for derivation]

[Equation 1]

h_i : 軸上マージナル光線の光線の高さ

α_i : 軸上マージナル光線の物体空間における換算傾角

α'_i : 軸上マージナル光線の像空間における換算傾角

\bar{h}_i : 近軸主光線の光線の高さ

$\bar{\alpha}_i$: 近軸主光線の物体空間における換算傾角

$\bar{\alpha}'_i$: 近軸主光線の像空間における換算傾角

I_i : 球面収差係数

II_i : コマ収差係数

III_i : 非点収差係数

P_i : ベッツバール収差係数

V_i : ディストーション (歪曲収差係数)

A definition is given. Here, the amount of many of a paraxial ray is the incident ray quantity and incident angle of a beam of light which carry out incidence to the field of optical system.

[0028] As mentioned above, although it inclines to an eccentric condition with parallel eccentricity and there are two kinds of conditions of eccentricity, the aberration of the eccentric aberration coefficient in the condition of parallel eccentricity and optical system is discussed previously, it inclines to a degree and the aberration of the eccentric aberration coefficient in the condition of eccentricity and optical system is discussed.

[0029] the i -th group by which optical system is constituted from the j -th page like drawing 2 in the optical system constituted by the page [n -th] optical operating surface at the k -th page — the reference axis of optical system — receiving — delta i only — the case where parallel eccentricity is carried out is considered. In this case, it is [0030] when the transverse aberration $\Delta Y_{\delta i}$ and $\Delta Z_{\delta i}$ of the beam of light by the parallel eccentricity of optical system is developed by the power.

[Equation 2]

$$\Delta Y_{\delta i} = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ (\Delta\delta)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\delta_1)_i - (V\delta_2)_i \} \right. \\ \left. + 2\tau h \{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \quad (2)$$

$$\Delta Z_{\delta i} = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\delta_1)_i + 2\tau h \{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \quad (3)$$

It comes out and defines. However, h , r , ϕ_r , and ϕ_ω are [0031] from drawing 1.

[Equation 3]

$$\tan \omega \cos \phi_\omega \equiv \frac{Y}{g} \quad \tan \omega \sin \phi_\omega \equiv \frac{Z}{g}$$

$$r \cos \phi_r \equiv \left(\frac{\hat{g}}{g} \right) Y^* \quad r \sin \phi_r \equiv \left(\frac{\hat{g}}{g} \right) Z^*$$

$$h \equiv N \tan \omega$$

It comes out and defines. It is the entrance pupil radius which the straight line to which N connects the refractive index by the side of the body of optical system, and ω connects the object point and the body side principal point H converted an optical axis, and the angle and ϕ_ω to make into the AJIMUSU, and converted r on the body side principal plane, and is ϕ_r . It is the AJIMUSU.

[0032] Moreover, parallel eccentricity comatic-aberration multiplier i ($II\delta_i$) [0033]

[Equation 4]

$$(\Pi\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n \Pi_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n \Pi_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n \Pi_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n \Pi_\nu) \quad (4)$$

Parallel eccentricity astigmatism multiplier i (IIIdelta) [0034]

[Equation 5]

$$(\text{III}\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n \text{III}_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n \text{III}_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n \text{III}_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n \text{III}_\nu) \quad (5)$$

Parallel eccentricity PETTSU bar aberration coefficient i (Pdelta) [0035]

[Equation 6]

$$(P\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n P_\nu) \quad (6)$$

An parallel eccentricity distortion aberration coefficient (Vdelta1 and Vdelta2) is [0036].

[Equation 7]

$$V\delta_1 = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n V_\nu) \quad (7)$$

$$V\delta_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu \quad (8)$$

A gap (delta) (i) of the image by parallel eccentricity is [0037].

[Equation 8]

$$(\Delta\delta)_i = -2(\alpha'_k - \alpha_j) \quad (9)$$

A definition can be given.

[0038] the i-th group by which optical system is constituted from the j-th page like drawing 3 in the optical system constituted by the page [n-th] optical operating surface like parallel eccentricity at the k-th page — the reference axis of optical system — receiving — epsilon only — the case where eccentricity is inclined and carried out is considered. It is [0039] when the transverse aberration deltaYpsilon and deltaZepsilon of the beam of light by the inclination eccentricity of optical system in this case is developed by the power.

[Equation 9]

$$\begin{aligned} \Delta Y_\epsilon &= -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \\ &\left\{ (\Delta\epsilon)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\epsilon_1)_i - (V\epsilon_2)_i \} \right. \\ &\quad + 2\tau h \left\{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(\text{III}\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \right\} \\ &\quad \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(\Pi\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_\epsilon &= -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\epsilon_1)_i + 2\tau h \left\{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(\text{III}\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \right\} \right. \\ &\quad \left. + r^2 \sin 2\phi_r (\Pi\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

It comes out and defines. At this time, it is the inclination eccentricity comatic-aberration multiplier (IIepsilon) i. [0040]

[Equation 10]

$$(\text{II}\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) - (\overline{\alpha'_k p'_k} \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \overline{\alpha_j p_j} \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) \quad (12)$$

Inclination eccentricity astigmatism multiplier i (IIIepsilon) [0041]

[Equation 11]

$$(\text{III}\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n \text{III}_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n \text{III}_\mu) - (\overline{\alpha'_k p'_k} \sum_{\mu=k+1}^n \text{III}_\mu - \overline{\alpha_j p_j} \sum_{\mu=j}^n \text{III}_\mu) \quad (13)$$

Inclination eccentricity PETTSU bar aberration coefficient i (Pepsilon) [0042]

[Equation 12]

$$(P\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n P_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n P_\mu) + (\frac{\alpha'_k}{N'_k} - \frac{\alpha_j}{N_j}) \quad (14)$$

An inclination eccentricity distortion aberration coefficient (Vpsilon1 and Vpsilon2) is [0043].
[Equation 13]

$$V\epsilon_1 = (\alpha'_k q'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j q_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k p'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j p_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) + (\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j}) \quad (15)$$

$$V\epsilon_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu + (\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j}) \quad (16)$$

A gap (epsilon) (i) of the image by inclination eccentricity is [0044].
[Equation 14]

$$(\Delta\epsilon)_i = -2(\alpha'_k q'_k - \alpha_j q_j) \quad (17)$$

A definition can be given. however, Pj, P'k, qj, and q'k As shown in drawing 3, respectively pj : Distance p'k from the center of rotation of the inclination of an optical group to the entrance pupil side of an optical group : Distance qj from the center of rotation of the inclination of an optical group to the exit pupil side of an optical group : Light Distance q'k from the center of rotation of the inclination of **** to the body side of an optical group : It is the amount defined by the distance from the center of rotation of the inclination of an optical group to the image surface of an optical group.

[0045] Next, the conventional performance index FO It explains by the case where the attenuation least square method (DLS law) which is a kind of the least square method is used as an example about the design technique of optical system in which it used. Here, it is the conventional performance index FO. It is premised on eccentricity having not arisen to optical system.
[0046] The performance index F in the DLS method is [0047].

[Equation 15]

$$F_o = \sum_{a=1}^m f_a^2 + \sum_{b=1}^n D(x_b - x_{ob})^2 \quad (18)$$

It comes out and defines. In the case of the DLS method, it is a performance index FO. When it becomes the minimal value of ****, it becomes the optical system which each aberration was amended good and was able to balance aberration also as the whole. This performance index FO It is [0048] in order to calculate the minimal value.

[Equation 16]

$$\frac{\partial F_o}{\partial x_b} = 0 \quad (19)$$

xb to satisfy What is necessary is just to ask for a group. Here, it is fa. It is related with the aberration of optical system and they are the wait of the a-th aberration, and Ra about wa. The value of the a-th aberration, and Ta When it considers as the desired value of the a-th aberration, it defines as fa =wa 2 (Ra-Ta). However, each aberration value Ra A design parameter x1, x2, ..., xn It is a function. Moreover, design parameter xb The value of the component of optical system, such as radius of curvature, and a spacing, a refractive index, the design parameter [xOb] at the design initiation time, and D express the damping factor, respectively. It serves for a damping factor D to prevent moderately that a design parameter separates from the value (initial value) in a design initiation time from. Moreover, the number of aberration by which m evaluates, and n express the number of the parameters used for a design, respectively.

[0049] The above performance indices FO It sets and each aberration value can approximate as a linear function of a design parameter near the initial value. For this reason, an equation (19) is xb. Since it receives and becomes linearity simultaneous equations, it is easily [at high speed and] calculable by solving with the least square method being possible, and using a computer.

[0050] Also in technique other than the DLS method, the performance index which *(ed) to each technique is defined.

Moreover, the value of a request of a performance index can be calculated at high speed and easily by using a computer.

Therefore, if these technique and computers are combined, the design value of the optimal optical system can be acquired at high speed and easily.

[0051] the value of a request of a performance index — Above DLS — when considering as the minimal value shown in law and except considering as the maximal value, it varies with the design technique.

[0052] Now, the design technique of the optical system concerning the operation gestalt of this invention is explained. The performance index F which is the operation gestalt of this invention is [0053].

[Equation 17]

$$F = F_o + F_{dec} \quad (20)$$

It comes out and defines. However, FO The performance index in the conventional design technique is expressed. Moreover, Fdec i (Idelta), i (IIdelta), i (Pdelta), i (Ilepsilon), i (IIlepsilon), and i (Pepsilon) It is the term of the performance index defined with at least one eccentric aberration coefficient inside. using such a performance index — the conventional performance index FO **** — the design of optical system can be seasoned with the variable component of the optical-character ability by the eccentricity which was not taken into consideration. Therefore, the beam-of-light aberration in the condition that the performance degradation of the optical system generated with the eccentricity of an optical group is controlled, and there is no eccentricity becomes possible [calculating the small design value of the optimal optical system].

[0054] It is F_{dec} still more preferably. It is good to consist of a term of the power sum of the absolute value of the eccentric aberration coefficient produced by each optical group. By using such a performance index, even if there is an optical group with the large absolute value of an eccentric aberration coefficient, the absolute value of the eccentric aberration coefficient can be made small. And it can control that the absolute value of the eccentric aberration coefficient of other optical groups becomes large at coincidence. Consequently, the optimum value of a performance index can be calculated more quickly. Therefore, by the design technique of this invention, a design more efficient than the conventional design technique can be performed.

[0055] For example, it is F_{dec} when it pays its attention to an parallel eccentricity comatic-aberration multiplier in the optical system which consists of n optical groups. It is desirable to give a definition like a formula (21). However, the ω and k as which the designer itself determines are the real number of arbitration.

[0056]

[Equation 18]

$$F_{dec} = \omega_{II_i} f \left(\sum_{i=1}^n |(\Pi\delta)_i|^{k_{II_i}} \right) \quad (21)$$

By using such a performance index, the absolute value of the parallel eccentricity comatic-aberration multiplier of other optical groups can make it hard to become large, and a design more efficient than the conventional design technique can be performed at the same time it makes small the absolute value of the parallel eccentricity comatic-aberration multiplier of an optical group with the large absolute value of an parallel eccentricity comatic-aberration multiplier.

[0057] Above, although the case of an parallel eccentricity comatic-aberration multiplier is described, even if it changes an parallel eccentricity comatic-aberration multiplier with an parallel eccentricity astigmatism multiplier, an parallel eccentricity PETTSU bar aberration coefficient, an inclination eccentricity comatic-aberration multiplier, an inclination eccentricity astigmatism multiplier, and an inclination eccentricity PETTSU bar aberration coefficient, it cannot be overemphasized that the same effectiveness is acquired.

[0058] Moreover, the term (variable) of a performance index can also be made into the power of the absolute value of the sum of two or more eccentric aberration coefficients instead of the sum of the power of the absolute value of one eccentric aberration coefficient, and the power of the sum of an absolute value. In this case, to say nothing of the same effectiveness as the above-mentioned being acquired, since balance can improve each eccentric aberration small within an optical group, it is still more desirable.

[0059] Moreover, the sum can be taken about what carried out power about two or more above-mentioned eccentric aberration coefficients, and it can also be made into the evaluation criteria of a performance index. If it does in this way, since balance can improve eccentric aberration of its that small by the whole optical system, it is desirable.

[0060] Moreover, the real number k of arbitration is good to fulfill the conditions which become $1 \leq k \leq 4$. If it separates from the above-mentioned conditions, it will become difficult to reconcile control of optimization of an aberration value and engine-performance change of the optical system by the manufacture error, and it will pose a problem.

[0061] Since the design technique of the optical system in this invention can be used most effectively and count of a computer is further made to a high speed by being referred to as $k=2$ still more preferably, it is the most desirable.

[0062] Drawing 4 is a flow chart which shows the procedure of the design technique of the optical system concerning this operation gestalt. The initial data of optical system is prepared at step 1. Many parameters which start the desired value of many aberration and the conventional performance index of a wait at step 2, and many parameters concerning the performance index introduced by this design technique are set up. A damping factor is set up at step 3. Here, the default of a damping factor is usually set up. A performance index is determined at the above step. Next, in step 4, the determinant about a performance index, i.e., simultaneous equations, is created, and a solution is acquired. When the value of a performance index is evaluated, it progresses to step 6 which continues when it judges with the value of a performance index having reached the desired value and it cannot reach at continuing step 5, it returns to step 3. In step 6, if the acquired design value satisfies a design objective, a design is ended, if dissatisfied, return and a design condition will be changed into step 2, and a design will be continued. In the flow mentioned above, from step 3 to the step 5 is suitable for the program of a computer.

[0063] The example of the optical system which used and designed the operation gestalt of this invention below is shown.

[0064] An example 1 shows the case where the design technique of optical system in which the parallel eccentricity comatic-aberration multiplier of this invention was used for the optical system of a digital camera is applied. MTF showing the image formation engine performance of the optical system which has an optical-path Fig. as shown in drawing 5, and has lens data at the time of design initiation as shown in the following table 1 is as drawing 6. However, in drawing 5, figures 1-12 show a field number, and sign A-E shows a lens element number. In addition, the specifications of optical system are focal distance =3.9mm, f number =2.8, and ideal image quantity =2.4mm, and MTF used for image evaluation is taken as evaluation with 50 spatial frequency/mm. Drawing 6 (a) is MTF on a shaft, drawing 6 (b) is MTF of 0.7 of image quantity, an axis of abscissa is defocusing, a continuous line is the value of the sagittal direction and a broken line is the value of the meridional direction.

[0065] When the lens element of this optical system is made into the unit of an optical group and each element carries out 0.1mm parallel eccentricity to an optical axis, the thing showing change of the image formation engine performance of the axial Uemitsu bundle is Table 2. However, R (%) is the change value of MTF of the direction of SAJIRU, and T (%) is the change value of the meridional direction. Even if an optical group carries out eccentricity, the effect on the engine performance supports the small thing, so that the value of this table is small.

[0066] such optical system — receiving — DLS — as a result of applying the design approach of this invention of having defined the performance index as the formula (22) based on law, optical system which has an optical-path Fig. as shown in drawing 7, and has lens data at the time of design termination as shown in the following table 3 is acquired.

[0067]

[Equation 19]

$$F = F_o + \omega_{II_i} \sum_{i=1}^k |(\Pi\delta)_i|^2 \quad (22)$$

The same MTF as drawing 6 showing the image formation engine performance at this time is as drawing 8, and is the image formation engine performance and abbreviation EQC in a design initiation time. When each lens of this optical system carries out

0.1mm parallel eccentricity to an optical axis, the image formation engine performance serves as change as shown in Table 4. The design value of the optical system which attains the engine performance of a design initiation time and an abbreviation EQC, and change of the engine performance by the parallel eccentricity of each lens cannot generate easily can be acquired from this. Moreover, the sum of squares of the absolute value of an parallel eccentricity comatic-aberration multiplier is small as shown in Table 5.

[0068] Below, the optical-system data a design initiation time and after a design are shown. However, the aspheric surface of optical-system data is defined by the following formulas using conic multiplier:K, curvature:c ($c=1/\text{radius of curvature}$), the 4th aspheric surface multiplier AC 4, and ...

[0069] $Z=cr^2 / [1+\sqrt{1-(1+K) c^2 r^2}] + AC \text{ four } r^4 \dots$ Here, the axis of coordinates with which Z met the optical axis, and r are the radii from the Z-axis.

[0070]

Table 1 Field number Radius of curvature Spacing Refractive index Abbe number Body side infinity infinity 1 8.9512 0.8000 1.48749 70.23 2 2.2965 3.9071 3 224.8333 1.8986 1.83400 37.16 4 -4.8216 0.8000 A drawing side infinity 2.88506 - 3.1214 0.8000 1.8466623.78 74.53684.00001. [78590] 44.20 8 -4.9428 0.1937 97.7737 (aspheric surface) 3.3651 1.56384 60.67 10 -11.3280 1.9084 11 infinity 2.5000 1.51633 64.14 12 infinity 1.1013 Image Field infinity Aspheric surface multiplier Field number K AC4 9 0.0 -8.8037x10⁻⁴.

[0071]

表 2

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
$\Delta MTF \quad R \quad (\%)$	-10.6	-19.6	-1.2	-0.2	0.0
$\Delta MTF \quad T \quad (\%)$	-26.9	-46.2	-12.4	-1.1	0.0

[0072]

Table 3 Field number Radius of curvature Spacing Refractive index Abbe number Body side infinity infinity 1 -1447.5433 0.8000 1.48749 70.23 2 3.1192 3.7577 3 18.5526 1.8222 1.83400 37.16 4 -6.7327 0.8000 A drawing side infinity 2.88716 - 3.6762 0.8000 1.8466623.78 7 5.44794.0000 1.77250 49.60 8 - 5.2921 0.1934 9 8.1262 (aspheric surface) 3.18601.56384 60.67 10 -10.4919 2.1689 11 infinity 2.5000 1.51633 64.14 12 infinity 1.2598 Image Field infinity Aspheric surface multiplier Field number K AC4 9 0.0 -9.7855x10⁻⁴.

[0073]

表 4

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
$\Delta MTF \quad R \quad (\%)$	-3.6	-5.5	-0.6	-0.4	0.0
$\Delta MTF \quad T \quad (\%)$	-9.9	-23.3	-12.2	-1.2	0.0

[0074]

表 5

設計開始時	設計後
0.0516	0.0170

[0075] As mentioned above, although the design technique of the optical system of this invention has been explained based on the principle and example, this invention is not limited to these examples etc., but various deformation is possible for it.

[0076] The design technique of the optical system of the above this invention can be constituted as follows, for example.

[0077] [1] So that the optical system expressed with two or more components may serve as a desired property Change the value of two or more of said components, and the value of each of said component approaching the value of the component optimal as said whole optical system by bringing the performance index to evaluate close to a desired value A means to calculate the eccentric aberration coefficient of an optical group which consists of the 1st [at least] page of the optical operating surfaces of said optical system in the design technique of optical system of acquiring the value of the optimal component. The design technique of the optical system characterized by having said performance index including at least one term of the performance index which consists of said at least one eccentric aberration coefficient.

[0078] [2] The design technique of the optical system one above-mentioned publication characterized by having a means to calculate the eccentric aberration coefficient which consists of a means to calculate the paraxial ray of said optical system, a means to calculate the aberration coefficient of an optical group which consists of the 1st [at least] page of the optical operating surfaces of said optical system, and said aberration coefficient and said paraxial ray.

[0079] [3] The design technique of the optical system two above-mentioned publication characterized by having a means to

calculate the power sum of an eccentric aberration coefficient, and said performance index which has the term of the performance index which consists of the power sum of at least one eccentric aberration coefficient in said optical system which consists of n optical groups.

[0080] [4] The design technique of the optical system three above-mentioned publication characterized by having said performance index which has the term of the performance index which consists of the power sum of an eccentric comatic-aberration multiplier.

[0081] [5] The design technique of the optical system the above 3 characterized by having said performance index which has the term of the performance index which consists of the power sum of an eccentric astigmatism multiplier.

[0082] [6] The design technique of the optical system the above 3 characterized by having said performance index which has the term of the performance index which consists of the power sum of an eccentric PETTSU bar aberration coefficient.

[0083] [7] So that the optical system expressed with two or more components may serve as a desired property Change the value of two or more of said components, and the value of each of said component approaching the value of the component optimal as said whole optical system by bringing the performance index to evaluate close to a desired value A means to calculate the eccentric aberration coefficient of an optical group which consists of the 1st [at least] page of the optical operating surfaces of said optical system in the design program of the optical system which acquires the value of the optimal component. The design program of the optical system characterized by having said performance index including at least one term of the performance index which consists of said at least one eccentric aberration coefficient.

[0084] [8] The record medium of the design program of the optical system characterized by recording the design program of the optical system of seven above-mentioned publication.

[0085] [9] Optical system characterized by being designed using the design technique of the optical system of six given in any 1 term, or the design program of the optical system of seven above-mentioned publication from the above 1.

[0086] [10] Optical equipment characterized by being designed using the design technique of the optical system of six given in any 1 term, or the design program of the optical system of seven above-mentioned publication from the above 1. [Effect of the Invention] According to the design technique of the optical system of this invention, in addition to optical designs, such as many aberration, optical system which controlled engine-performance change of the optical system by the manufacture error can be efficiently designed now so that clearly from the above explanation.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is a sectional view including the optical axis in which optical system is shown typically.

[Drawing 2] It is drawing for explaining the parallel eccentricity of optical system.

[Drawing 3] It is drawing for explaining the inclination eccentricity of optical system.

[Drawing 4] It is the flow chart which shows the procedure of the design technique of the optical system concerning 1 operation gestalt of this invention.

[Drawing 5] It is the optical-path Fig. of the lens system at the time of design initiation of one example of this invention.

[Drawing 6] It is drawing showing MTF of the lens system of drawing 5.

[Drawing 7] It is the optical-path Fig. of the lens system at the time of design termination of one example of this invention.

[Drawing 8] It is drawing showing MTF of the lens system of drawing 7.

[Description of Notations]

1-12 — Page [1st] - the 11th page

A-E — Lens element

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-267926
(P2002-267926A)

(43) 公開日 平成14年9月18日 (2002.9.18)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーム(参考)
G 0 2 B 13/00		G 0 2 B 13/00	2 H 0 8 7
13/04		13/04	D 5 B 0 4 6
13/18		13/18	
G 0 6 F 17/50	6 8 0	G 0 6 F 17/50	6 8 0 A

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2001-64836(P2001-64836)

(22) 出願日 平成13年3月8日 (2001.3.8)

(71) 出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

(72) 発明者 早川 和仁

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号 オリ

ンパス光学工業株式会社内

(74) 代理人 100097777

弁理士 荻澤 弘 (外7名)

Fターム(参考) 2H087 LA03 PA04 PA18 PB05 QA02

QA03 QA07 QA17 QA19 QA21

QA26 QA34 QA41 QA46 RA05

RA12 RA42

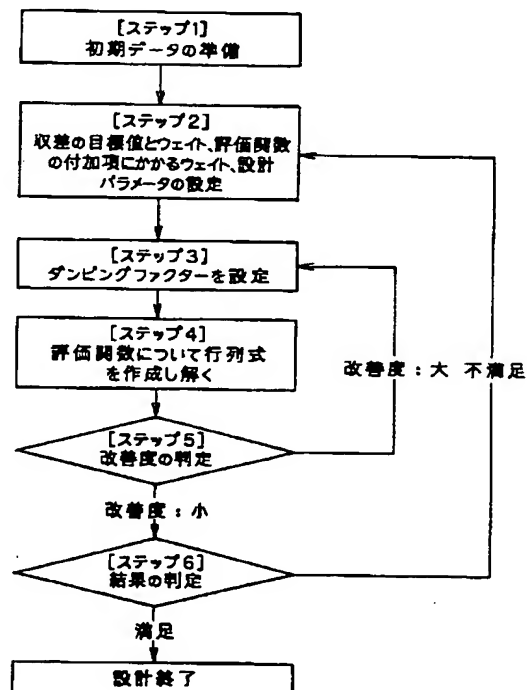
5B046 AA09 BA02

(54) 【発明の名称】 光学系の設計手法

(57) 【要約】

【課題】 コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法。

【解決手段】 複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、その複数の構成要素の値を変更し、各構成要素の値が光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む評価関数とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、

前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、

前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計手法。

【請求項2】 前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることを特徴とする請求項1記載の光学系の設計手法。

【請求項3】 複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことを特徴とする請求項2記載の光学系の設計手法。

【発明の詳細な説明】**【0001】**

【発明の属する技術分野】 本発明は、光学系の設計手法に関し、特に、コンピュータ等の計算処理装置での実行に適した光学系の設計手法、及び、光学系の設計プログラムを記録した記録媒体、及び、本光学系の設計手法乃至光学系の設計プログラムを用いて設計した光学系及び光学装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 光学系の設計手法では、最急降下法、共役勾配法、最小二乗法等が利用されている。何れの方法も、最適化手法と呼ばれるもので、複数の変数を有する評価関数が用いられる。これらの最適化手法を光学系の設計に用いた場合、評価関数の変数に相当するのが評価項目（例えば、収差係数）である。この評価項目は、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率等といった光学系の構成要素の値に基づいて算出される。よって、構成要素の値を変化させると評価項目の値が変化し、評価項目の値が変化すると評価関数の値が変化する。そこで、構成要素の値を様々に変化させ、評価関数の最適値（例えば、最小値や極小値）を求める処理を行う。このようにして評価関数の最適値が得られると、そのときにおける各構成要素の値の組み合わせが最適な光学系を表すことになる。この結果、理想状態に近い光学系の構成要素の値が得られる。なお、評価関数の最適値を求める際には、同時に評価項目も所望の目標値へと近づけることを行う。このように、光学系の設計は、評価関数が最適値となり、かつ、評価項目が目標値の範囲内に到達するような、光学系の構成要素の値の組み合わせを求めるものである。

【0003】 上述のように、光学系の設計に際しては、

基本的な変数として、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率を用いるのが一般的である。また、評価関数は、光線収差や光学系の仕様で決まる制限条件等を評価項目として用いるのが一般的である。

【0004】 しかしながら、従来の光学系の設計では、理想的な状態で光学系を設計しているため、光学系の製造誤差の影響を無視した設計となる傾向がある。そのため、製造誤差による光学系の性能の変化を考慮に入れた、最適な光学系の構成要素の値の組み合わせ（設計値）を得ることが困難であった。

【0005】 従来の技術においては、設計者の経験や知識といったノウハウ等に基づいて、製造誤差による光学系の性能の変化が少なくなるように、コンピュータで得た設計値から設計者自身の手作業によって設計値に若干の修正を加えたり、光学系の変数の一部を固定値とし、変数の数に制限をかける等をして、最適な光学系の設計値を得るといった作業を行う必要があった。

【0006】 このため、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、従来の光学系の設計では人手と時間が必要で、効率的な光学系の設計が行えなかった。また、製造誤差による性能の変化を小さく抑え、かつ、設計性能が所望の値となる最適な光学系の設計値を得るのが難しい。

【0007】 近年、上記の問題点を鑑み、特開平11-30746号公報、特開平11-223764号公報、特開平11-223769号公報、特許第3006611号公報等で新たな設計法が提案されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】 特開平11-30746号で開示されている方法においては、注目している光学群以外の偏心収差係数の絶対値が急激に悪化して、結果的に製造誤差の影響を受ける設計値が得られてしまう。これを回避するため、その都度注目する光学群の偏心収差係数を増やしていくことは、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0009】 特開平11-223764号、特開平11-223769号で開示されている方法においては、球面収差係数とコマ収差係数のみに注目しているため、光学系の偏心による非点収差や像面の傾きによる性能変化の顕著な光学系においては、製造誤差の影響を受け難い設計解が得られなくなり、問題がある。

【0010】 特許第3006611号で開示されている方法においては、複数の光学部材で構成される光学系に対して、全ての製造誤差を考慮した設計状態を実現すること、全ての状態での評価関数を定義することが必要であったり、評価関数が複雑となるために評価関数の計算量が莫大となってしまう、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0011】 本発明は従来技術の上記問題に鑑みてなさ

れたものであり、その目的は、コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする手法である。

【0013】この場合、前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることが望ましい。

【0014】また、複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことが望ましい。

【0015】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心コマ収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0016】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心非点収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0017】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心ベッツバール収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0018】本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計プログラムにおいて、前記評価関数は少なく

$$(\text{収差}) = (\text{偏心のない状態での収差}) + (\text{偏心により発生する収差})$$

(1)

で定義される。式(1)から明らかなように、光学系の一部が偏心することによって生ずる収差(偏心収差)によって、光学系の性能は変化してしまう。現実の光学系では、偏心はレンズの製造、あるいは、レンズの組み立て時の製造誤差(組み立て誤差)として現れる。このように、偏心(製造誤差)は、理想的な光学系の性能を得ることを困難ならしめる要因の1つとなっている。

【0024】光学作用面や光学群が偏心することによって、光学系の結像性能に変化が発生するが、この変化を代弁する指標の1つに、偏心収差係数がある。偏心収差係数には、偏心コマ収差、偏心非点収差、偏心ベッツバール収差(偏心による像面の傾きの収差)、偏心デストーション(偏心歪曲収差)、偏心による像のずれがある。これら偏心収差係数は、近軸光線の追跡結果と3次の収差係数により記述される。

【0025】なお、偏心収差並びに偏心収差係数の導出方法は、松居吉哉著「偏心の存在する光学系の3次の収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、1990年)に、3次の収差係数の導出については、松居吉哉著「収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、

とも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計プログラムを含むものである。

【0019】また、上記の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体を含むものである。

【0020】さらに、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学系を含むものである。

【0021】また、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学装置を含むものである。

【0022】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。まず、本発明で用いる偏心収差係数について説明する。

【0023】光学系を構成する光学作用面、又は、少なくとも1面の光学作用面よりなる光学群の光軸が、光学系の基準軸に対して一致していない状態を偏心状態という。この中、図2に示すように、上記光軸が基準軸に対して平行にずれた状態を平行偏心、図3に示すように、上記光軸が基準軸に対して傾きを持って交わるような状態を傾き偏心とする。光学系に前述のような平行偏心乃至傾き偏心が発生した状態の光学系の収差は、

1989年)に詳述されているため、割愛し、偏心収差係数と偏心収差の定義のみを記述する。

【0026】まず、偏心収差係数を導出に必要な光学系の第*i*面における近軸光線の諸量と3次の収差係数を、

【0027】

【数1】

h_i : 軸上マージナル光線の光線の高さ

α_i : 軸上マージナル光線の物体空間における換算傾角

α'_i : 軸上マージナル光線の像空間における換算傾角

\bar{h}_i : 近軸主光線の光線の高さ

$\bar{\alpha}_i$: 近軸主光線の物体空間における換算傾角

$\bar{\alpha}'_i$: 近軸主光線の像空間における換算傾角

I_i : 球面収差係数

II_i : コマ収差係数

III_i : 非点収差係数

P_i : ベッツパール収差係数

V_i : ディストーション(歪曲収差係数)

$$\begin{aligned} \Delta Y_\delta = & -\frac{E_i}{2\alpha'} \\ & \left\{ (\Delta\delta)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\delta_1)_i - (V\delta_2)_i \} \right. \\ & + 2rh \left\{ 2\cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega) \right\} (III\delta)_i + \cos\phi_r \cos\phi_\omega (P\delta)_i \\ & \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r) (II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_\delta = & -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\delta_1)_i + 2rh \left\{ \sin(\phi_r + \phi_\omega) (III\delta)_i + \sin\phi_r \cos\phi_\omega (P\delta)_i \right\} \right. \\ & \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

で定義される。ただし、 h 、 r 、 ϕ_r 、 ϕ_ω は、図1より、

【0031】

【数3】

$$\begin{aligned} \tan\omega \cos\phi_\omega &\equiv \frac{Y}{\bar{g}} & \tan\omega \sin\phi_\omega &\equiv \frac{Z}{\bar{g}} \\ r \cos\phi_r &\equiv \left(\frac{\bar{g}}{g}\right) Y^* & r \sin\phi_r &\equiv \left(\frac{\bar{g}}{g}\right) Z^* \end{aligned}$$

$$h \equiv N \tan\omega$$

$$(II\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) - (\bar{\alpha}'_k \sum_{\nu=k+1}^n I_\nu - \bar{\alpha}_j \sum_{\nu=j}^n I_\nu) \quad (4)$$

と、平行偏心非点収差係数 $(III\delta)_i$ は、

【0034】

$$(III\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n III_\nu) - (\bar{\alpha}'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \bar{\alpha}_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) \quad (5)$$

と、平行偏心ベッツパール収差係数 $(P\delta)_i$ は、

【0035】

と定義する。ここで、近軸光線の諸量とは、光学系の面に入射する光線の入射光線高と入射角である。

【0028】前述のように、偏心状態には平行偏心と傾き偏心の2種類の状態があるが、先に平行偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論じ、次に傾き偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論ずる。

【0029】光学系が n 面の光学作用面により構成されている光学系において、図2のように、 j 面から k 面で構成される第 i 群が光学系の基準軸に対して、 δ_i だけ平行偏心した場合を考える。この場合、光学系の平行偏心による光線の横収差 ΔY_δ 、 ΔZ_δ を幕で展開すると、

【0030】

【数2】

で定義される。 N は光学系の物体側の屈折率、 ω は物点と物体側主点 H とを結ぶ直線が光軸となす角、 ϕ_ω はそのアジマス、また、 r は物体側主平面上に換算した入射瞳半径で、 ϕ_r がそのアジマスである。

【0032】また、平行偏心コマ収差係数 $(II\delta)_i$ は、

i は、

【0033】

【数4】

【数5】

【数6】

$$(P\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n P_\nu) \quad (6) \quad \begin{array}{l} 2) \text{ は、} \\ \text{【0036】} \end{array}$$

と、平行偏心ディストーション収差係数 ($V\delta_1$, $V\delta_2$) は、【数7】

$$V\delta_1 = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) \quad (7)$$

$$V\delta_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu \quad (8)$$

と、平行偏心による像のずれ ($(\delta)_i$) は、【数8】
【0037】

$$(\Delta\delta)_i = -2(\alpha'_k - \alpha_j) \quad (9)$$

と定義できる。

【0038】 平行偏心と同様に、光学系がn面の光学作用面により構成されている光学系において、図3のように、j面からk面で構成される第i群が光学系の基準軸に対して、 ε_j だけ傾き偏心した場合を考える。この場

合の、光学系の傾き偏心による光線の横収差 ΔY_ε 、 ΔZ_ε を幕で展開すると、

【0039】

【数9】

$$\begin{aligned} \Delta Y_\varepsilon = & -\frac{\varepsilon_i}{2\alpha'} \left\{ (\Delta\epsilon)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\epsilon_1)_i - (V\epsilon_2)_i \} \right. \\ & + 2rh \{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \\ & \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_\varepsilon = & -\frac{\varepsilon_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\epsilon_1)_i + 2rh \{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} \right. \\ & \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

で定義される。このとき、傾き偏心コマ収差係数 ($II\varepsilon$)_i は、【0040】
【数10】

$$(II\varepsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n II_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n II_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n I_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n I_\mu) \quad (12)$$

と、傾き偏心非点収差係数 ($III\varepsilon$)_i は、【数11】
【0041】

$$(III\varepsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n III_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n III_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n II_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n II_\mu) \quad (13)$$

と、傾き偏心ベッツバール収差係数 ($P\varepsilon$)_i は、【数12】
【0042】

$$(P\varepsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n P_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n P_\mu) + \left(\frac{\alpha'_k}{N'_k} - \frac{\alpha_j}{N_j} \right) \quad (14)$$

と、傾き偏心ディストーション収差係数 ($V\varepsilon_1$, $V\varepsilon_2$) は、【0043】
【数13】

$$V\epsilon_1 = (\alpha'_k q'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j q_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k p'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j p_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j} \right) \quad (15)$$

$$V\epsilon_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{N'_k} - \frac{\overline{\alpha_j}}{N_j} \right) \quad (16)$$

と、傾き偏心による像のずれ $((\epsilon)_j)$ は、

【0044】

$$(\Delta\epsilon)_i = -2(\alpha'_k q'_k - \alpha_j q_j)$$

と定義できる。ただし、 P_j 、 P'_k 、 q_j 、 q'_k

k は、図3に示すように、それぞれ、

p_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の入射瞳面までの距離

p'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の射出瞳面までの距離

q_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の物体面までの距離

q'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の像面まで

【数14】

(17)

の距離で定義される量である。

【0045】次に、従来の評価関数 F_0 を用いた光学系の設計手法について、例として、最小二乗法の一つである減衰最小二乗法(DLS法)を用いた場合で説明する。ここで、従来の評価関数 F_0 は、光学系に偏心が生じていないことを前提としている。

【0046】DLS法での評価関数 F は、

【0047】

【数15】

$$F_0 = \sum_{a=1}^m f_a^2 + \sum_{b=1}^n D(x_b - x_{0b})^2 \quad (18)$$

で定義される。DLS法の場合、評価関数 F_0 の値がの極小値となったときに、各収差が良好に補正され、かつ、全体としても収差のバランスが取れた光学系となる。この評価関数 F_0 の極小値を求めるためには、

【0048】

【数16】

$$\frac{\partial F_0}{\partial x_b} = 0 \quad (19)$$

を満足する x_b の組を求めればよい。ここで、 f_a は光学系の収差に関し、 w_a を第 a 番目の収差のウェイト、 R_a を a 番目の収差の値、 T_a を第 a 番目の収差の目標値としたとき、

$$f_a = w_a (R_a - T_a)^2$$

で定義される。ただし、各収差値 R_a は設計パラメータ x_1, x_2, \dots, x_n の関数である。また、設計パラメータ x_b は曲率半径や面間隔、屈折率等の光学系の構成要素の値、 x_{0b} は設計開始時点における設計パラメータ、 D はダンピングファクターをそれぞれ表している。ダンピングファクター D は、設計パラメータが設計開始時点での値(初期値)から離れることを適度に防ぐ働きをする。また、 m は評価を行う収差の数、 n は設計

に用いるパラメータの数をそれぞれ表している。

【0049】上記のような評価関数 F_0 において、初期値近傍では各収差値が設計パラメータの線形関数として近似できる。このため、式(19)は x_b に対して線形な連立方程式となるので、最小二乗法により解くことが可能であり、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に計算することができる。

【0050】DLS法以外の手法においても、各手法に則した評価関数が定義されている。また、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に評価関数の所望の値を求めることができる。よって、これらの手法とコンピュータを組み合わせれば、最適な光学系の設計値を高速かつ容易に得ることができる。

【0051】評価関数の所望の値は、上記DLS法に示した極小値とする場合以外に、極大値とする場合等、設計手法により様々である。

【0052】さて、本発明の実施形態にかかる光学系の設計手法について説明する。本発明の実施形態である評価関数 F は、

【0053】

【数17】

(20)

で定義される。ただし、 F_0 は、従来の設計手法における評価関数を表す。また、 F_{dec} は、 $(||\delta)_j$ 、 $(||\delta)_j$ 、 $(P\delta)_j$ 、 $(||\epsilon)_j$ 、 $(||\epsilon)_j$ 、 $(P\epsilon)_j$ の中、少なくとも1つの偏心収差係数により定義される評価関数の項である。このような評価関数を用いることで、従来の評価関数 F_0 では考慮しなかった

偏心による光学性能の変化成分を、光学系の設計に加味することができる。よって、光学群の偏心により発生する光学系の性能劣化が抑制され、かつ、偏心のない状態での光線収差が小さい、最適な光学系の設計値を求めることが可能となる。

【0054】さらに好ましくは、 F_{dec} は、各光学群で

生ずる偏心収差係数の絶対値の冪乗和の項からなるとよい。このような評価関数を用いることで、偏心収差係数の絶対値が大きい光学群があったとしても、その偏心収差係数の絶対値を小さくすることができる。しかも、同時に、他の光学群の偏心収差係数の絶対値が大きくなることを抑制することができる。この結果、評価関数の最適値をより速く求めることができる。よって、本発明の設計手法では、従来の設計手法よりも効率的な設計ができる。

$$F_{dec} = \omega_{dec} f \left(\sum_{i=1}^n |(\Pi\delta)_i|^{k_{\delta i}} \right) \quad (21)$$

このような評価関数を用いることで、平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きい光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値を小さくすると同時に、他の光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きくなり難くすることができ、従来の設計手法よりも効率的な設計ができる。

【0057】上記では、平行偏心コマ収差係数の場合について述べているが、平行偏心コマ収差係数を平行偏心非点収差係数、平行偏心ベッツパル収差係数、傾き偏心コマ収差係数、傾き偏心非点収差係数、傾き偏心ベッツパル収差係数と変更しても、同様の効果が得られることは言うまでもない。

【0058】また、評価関数の項（変数）を1つの偏心収差係数の絶対値の冪乗の和ではなく、複数の偏心収差係数の和の絶対値の冪乗や、絶対値の和の冪乗とすることもできる。この場合、前述と同様な効果が得られることは言うまでもなく、さらに、光学群内でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0059】また、上述の複数の偏心収差係数について冪乗したものについて和をとり、それを評価関数の評価項目とすることもできる。このようにすれば、光学系全体でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0060】また、任意の実数 k は、 $1 \leq k \leq 4$ なる条件を満たすことがよい。上記条件を外れると、収差値の最適化と製造誤差による光学系の性能変化の抑制を両立させることが難しくなってしまう、問題となってしまう。

【0061】さらに好ましくは、 $k=2$ とすることで、本発明における光学系の設計手法を最も有効に働かせることができ、さらに、コンピュータの計算を高速にできるので、最も望ましい。

【0062】図4は、本実施形態にかかる光学系の設計手法の手順を示すフローチャートである。ステップ1で、光学系の初期データを用意する。ステップ2で、諸収差の目標値とウェイトといった従来の評価関数にかかる諸パラメータ、及び、本設計手法で導入した評価関数にかかる諸パラメータを設定する。ステップ3で、ダンピングファクターを設定する。ここで、通常はダンピン

きる。

【0055】例えば、 n 個の光学群よりなる光学系において、平行偏心コマ収差係数に着目する場合、 F_{dec} は、式(21)のように定義することが好ましい。ただし、 ω は設計者自身の定めるウェイト、 k は任意の実数である。

【0056】

【数18】

グファクターのデフォルト値が設定される。以上のステップで、評価関数を決定する。次に、ステップ4において、評価関数についての行列式、すなわち、連立方程式を作成し、解を得る。続くステップ5で、評価関数の値を評価し、評価関数の値が所望の値に到達したと判定した場合、続くステップ6へと進み、到達し得ない場合、ステップ3へと戻る。ステップ6において、得られた設計値が設計目標を満足するならば、設計を終了し、不満足ならば、ステップ2に戻り、設計条件を変更して設計を続行する。上述したフローにおいて、ステップ3からステップ5までがコンピュータのプログラムに適している。

【0063】以下に、本発明の実施形態を用いて設計した光学系の実施例を示す。

【0064】実施例1は、デジタルカメラの光学系に、本発明の平行偏心コマ収差係数を用いた光学系の設計手法を適用した場合について示す。図5に示すような光路図を持ち、以下の表1に示すような設計開始時のレンズデータを持つ光学系の結像性能を表すMTFは、図6の通りである。ただし、図5において数字1~12は面番号を示し、符号A~Eはレンズエレメント番号を示す。なお、光学系の仕様は、焦点距離=3.9mm、Fナンバー=2.8、理想像高=2.4mmであり、像評価に用いるMTFは、空間周波数50本/mmでの評価とする。図6(a)は軸上でのMTF、図6(b)は像高の0.7でのMTFであり、横軸はデフォーカスであり、実線はサジタル方向の値、破線はメリジオナル方向の値である。

【0065】この光学系のレンズエレメントを光学群の単位とし、各エレメントが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、軸上光束の結像性能の変化を表したものが表2である。ただし、 $R(\%)$ はサジタル方向のMTFの変化値、 $T(\%)$ はメリジオナル方向の変化値である。この表の値が小さい程、光学群が偏心しても性能への影響が小さいことに対応している。

【0066】このような光学系に対して、DLS法を基に評価関数を式(22)と定義した本発明の設計方法を適用した結果、図7に示すような光路図を持ち、以下の表3に示すような設計終了時のレンズデータを持つよう

な光学系が得られる。

【0067】

【数19】

$$F = F_0 + w_{\Pi\delta} \sum_{i=1}^k |(\Pi\delta)_i|^2 \quad (22)$$

このときの結像性能を表す図6と同様のMTFは図8の通りであり、設計開始時点での結像性能と略同等である。この光学系の各レンズが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、結像性能が表4のような変化となる。このことから、設計開始時点と略同等の性能を達成し、かつ、各レンズの平行偏心による性能の変化が発生し難い光学系の設計値を得ることができる。また、平行偏心コマ収差係数の絶対値の二乗和は、表5のように小さくなっている。

【0068】以下に、設計開始時点と設計後の光学系デ

ータを示す。ただし、光学系データの非球面は、コーニク係数：K、曲率：c（ $c = 1/\text{曲率半径}$ ）、4次の非球面係数 AC_4 、・・・を用いて、以下の式で定義される。

$$\text{【0069】 } Z = c r^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + K) c^2 r^2}] + AC_4 r^4 \dots$$

ここで、Zは光軸に沿った座標軸、rはZ軸からの半径である。

【0070】

表1

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッベ数
物体面	∞	∞		
1	8.9512	0.8000	1.48749	70.23
2	2.2965	3.9071		
3	224.8333	1.8986	1.83400	37.16
4	-4.8216	0.8000		
絞り面	∞	2.8850		
6	-3.1214	0.8000	1.84666	23.78
7	4.5368	4.0000	1.78590	44.20
8	-4.9428	0.1937		
9	7.7737（非球面）	3.3651	1.56384	60.67
10	-11.3280	1.9084		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.1013		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC_4		
9	0.0	-8.8037×10^{-4}		

【0071】

表2

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
$\Delta MTF \quad R(\%)$	-10.6	-19.6	-1.2	-0.2	0.0
$\Delta MTF \quad T(\%)$	-26.9	-46.2	-12.4	-1.1	0.0

【0072】

表3

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッベ数
物体面	∞	∞		
1	-1447.5433	0.8000	1.48749	70.23
2	3.1192	3.7577		
3	18.5526	1.8222	1.83400	37.16
4	-6.7327	0.8000		

絞り面	∞	2.8871		
6	-3.6762	0.8000	1.84666	23.78
7	5.4479	4.0000	1.77250	49.60
8	-5.2921	0.1934		
9	8.1262 (非球面)	3.1860	1.56384	60.67
10	-10.4919	2.1689		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.2598		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC ₄		
9	0.0	-9.7855 $\times 10^{-4}$		

【0073】

表4

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
Δ MTF R (%)	-3.6	-5.5	-0.6	-0.4	0.0
Δ MTF T (%)	-9.9	-23.3	-12.2	-1.2	0.0

【0074】

表5

設計開始時	設計後
0.0516	0.0170

【0075】以上、本発明の光学系の設計手法をその原理と実施例に基づいて説明してきたが、本発明はこれら実施例等に限定されず種々の変形が可能である。

【0076】以上の本発明の光学系の設計手法は、例えば次のように構成することができる。

【0077】〔1〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計手法。

【0078】〔2〕前記光学系の近軸光線を計算する手段と、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の収差係数を計算する手段と、前記収差係数と前記近軸光線とからなる偏心収差係数を計算する手段とを有することを特徴とする上記1記載の光学系の設計手法。

【0079】〔3〕 n 個の光学群よりなる前記光学系において、偏心収差係数の冪乗和を計算する手段と、少

なくとも1つの偏心収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記2記載の光学系の設計手法。

【0080】〔4〕偏心コマ収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記3記載の光学系の設計手法。

【0081】〔5〕偏心非点収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0082】〔6〕偏心ベッツバール収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0083】〔7〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計プログラムにおいて、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計プログラム。

【0084】〔8〕 上記7記載の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体。

【0085】〔9〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学系。

【0086】〔10〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学装置。

【発明の効果】以上の説明から明らかなように、本発明の光学系の設計手法によると、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うことができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 光学系を模式的に示す光軸を含む断面図である。

【図2】 光学系の平行偏心を説明するための図である。

【図3】 光学系の傾き偏心を説明するための図である。

【図4】 本発明の1実施形態にかかる光学系の設計手法の手順を示すフローチャートである。

【図5】 本発明の1実施例の設計開始時のレンズ系の光路図である。

【図6】 図5のレンズ系のMTFを示す図である。

【図7】 本発明の1実施例の設計終了時のレンズ系の光路図である。

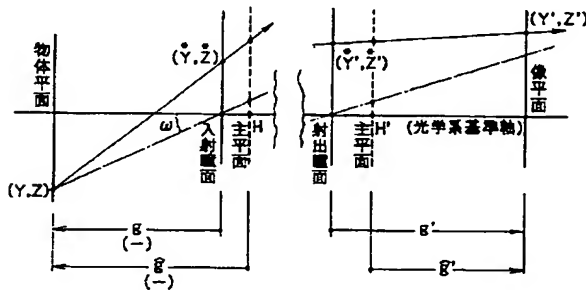
【図8】 図7のレンズ系のMTFを示す図である。

【符号の説明】

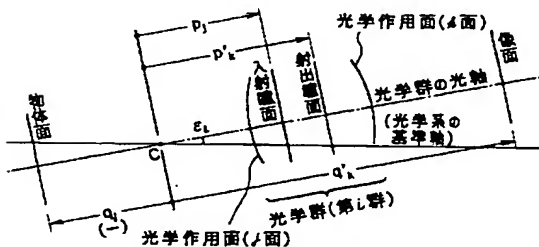
1～12…第1面～第11面

A～E…レンズエレメント

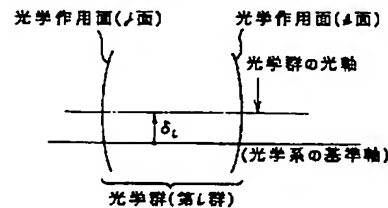
【図1】



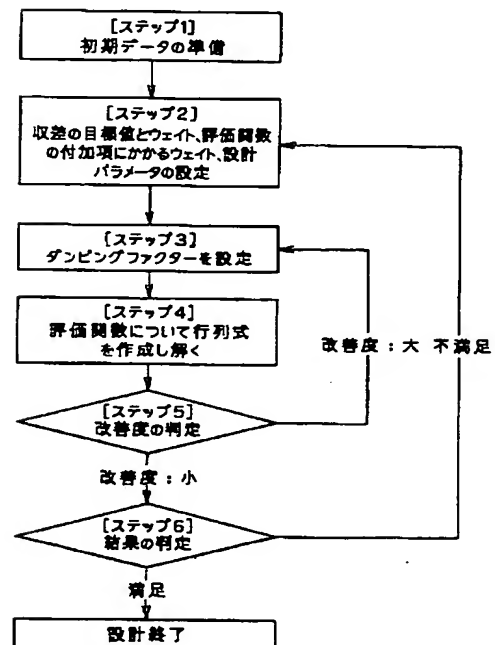
【図3】



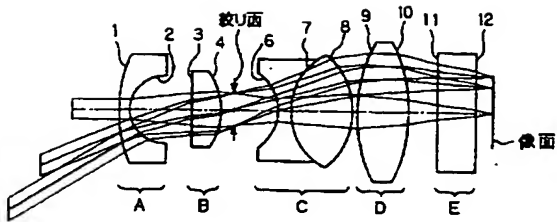
【図2】



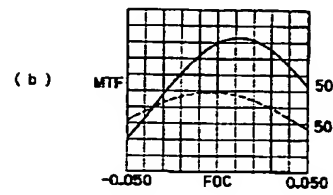
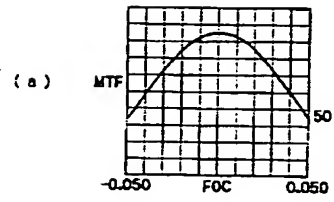
【図4】



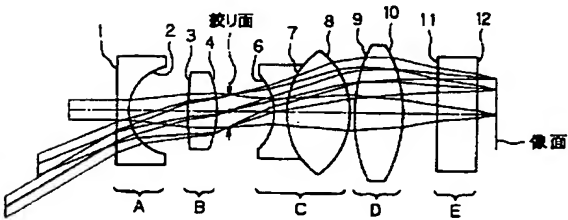
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

